

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 08-248364

(43)Date of publication of application : 27.09.1996

(51)Int.Cl.

G02F 1/025

G02B 6/12

H01S 3/18

(21)Application number : 07-048088

(71)Applicant : OKI ELECTRIC IND CO LTD

(22)Date of filing : 08.03.1995

(72)Inventor : YAMADA MITSUSHI
KUNII TATSUO

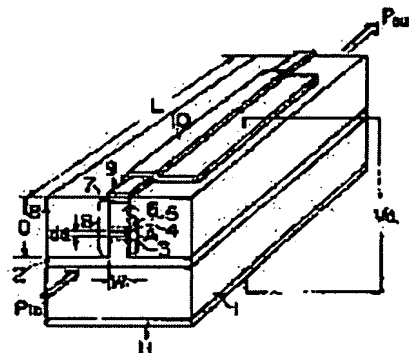
(54) LIGHT INTENSITY MODULATION ELEMENT AND SEMICONDUCTOR LASER WITH LIGHT INTENSITY MODULATION ELEMENT

(57)Abstract:

PURPOSE: To make it possible to obtain a large transmission capacity and to make the distance of optical communication longer and capacity higher.

CONSTITUTION: A light absorption layer 4 is formed of a bulk material and a difference (energy detuning ΔE) between its band gap energy E_{g0} and the photo energy E_{in} of incident light (light to be modulated) P_{in} is so selected as to enter such a range where the absorption generated by voltage impression increases and a refractive index decreases. Further, the thickness d_a and length L of the light absorption layer 4 are so set that the absorption of the light at the time of voltage non-impression is suppressed to the lowest possible level and that desired extinction efficiency is obtd.

An electric field is applied on the light absorption layer 4 and the absorption coefft. of the incident light P_{in} is changed by this electric field when voltage is impressed on this layer.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 28.12.1998

[Date of sending the examiner's decision of rejection] 15.05.2001

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平8-248364

(43) 公開日 平成8年 (1996) 9月27日

(51) Int. Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 2 F	1/025		G 0 2 F 1/025	
G 0 2 B	6/12		H 0 1 S 3/18	
H 0 1 S	3/18		G 0 2 B 6/12	J

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 10 頁)

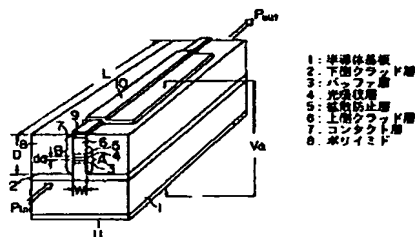
(21) 出願番号	特願平7-48088	(71) 出願人	000000295 沖電気工業株式会社 東京都港区虎ノ門1丁目7番12号
(22) 出願日	平成7年 (1995) 3月8日	(72) 発明者	山田 光志 東京都港区虎ノ門1丁目7番12号 沖電気工業株式会社内
		(72) 発明者	国井 達夫 東京都港区虎ノ門1丁目7番12号 沖電気工業株式会社内
		(74) 代理人	弁理士 柿本 恭成

(54) 【発明の名称】 光強度変調素子及び光強度変調素子付き半導体レーザ

(57) 【要約】

【目的】 大きな伝送容量が得られ、光通信の長距離化、及び大容量化を図る。

【構成】 光吸収層4は、バルク材料で形成され、かつそのバンドギャップエネルギー E_g 0 と入射光 (被変調光) P_{in} の光子エネルギー E_{in} の差 (エネルギーディチューニング ΔE) が、電圧印加によって生じる吸収が増加し、かつ屈折率が減少するような範囲に入るように選ばれる。さらに、電圧無印加時での光の吸収をできるだけ小さく抑え、かつ所望の消光効率が得られるように、光吸収層4の厚さ d_a 及び長さ L が設定される。電圧を印加すると、光吸収層4に電界がかかり、その電界によって入射光 P_{in} の吸収係数が変化する。



本発明の第1の実施例の光強度変調素子

【特許請求の範囲】

【請求項1】 半導体基板上に形成され、i型光吸収層の両側にp型層とn型層が設けられたp-i-n構造に電圧を印加すると、該i型光吸収層に電界がかかり、その電界によって入射光の吸収係数が変化する光強度変調素子において、

前記光吸収層をバルク材料で形成し、かつ波長ディチューニング $\Delta\lambda$ を $20\text{ nm} \leq \Delta\lambda \leq 60\text{ nm}$ 、あるいはエネルギーディチューニング ΔE を $10.5\text{ meV} \leq \Delta E \leq 32.2\text{ meV}$ に設定したことを特徴とする光強度変調素子。

【請求項2】 請求項1記載の光強度変調素子において、前記光吸収層の層さ d_a (μm) 及び素子長 L (μm) を次式から得られる値に設定することを特徴とする光強度変調素子。

$$a_1 \exp\{0.45\Delta\lambda\} < L < a_2 \exp\{0.2\Delta\lambda\}$$

$$a_1 = -82.27d_a + 38.5$$

$$a_2 = -150.55d_a + 62$$

【請求項3】 請求項2記載の光強度変調素子を、半導体レーザと組合せて、あるいは同一の半導体基板上に集積化して光出力を得る構成にしたことを特徴とする光強度変調素子付き半導体レーザ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】 本発明は、光通信等に用いられる外部変調方法の光強度変調素子（例えば、光強度変調時に生じる位相変調成分が極めて小さい低波長チャープ（分散）の電界吸収型光強度変調素子）と、該光強度変調素子と半導体レーザを組合せた光強度変調素子付き半導体レーザに関するものである。

【0002】

【従来の技術】 従来、このような分野の技術としては、例えば次のような文献に記載されるものがあつた。

文献1：犬石・浜川・白藤共著「半導体物性I」初版（昭52-6）朝倉書店、P. 210-212

文献2：ジャーナル オブ ライトウェーブ テクノロジー (Journal of lightwave technology)、1 [1]

(1988-1) IEEE (米) F. Koyama, K. Iga "Frequency Chirping in External Modulators" P. 87-93

Bulk: $|\alpha| = 1 \sim 2$

QW (Quantum Well, 量子井戸): $|\alpha| = 1$

...

と記載されている。但し、その値は、入射光波長 λ と電界強度 E に依存している。電界吸収型光強度変調素子は、種々提案されており、例えば前記文献3ではMQW構造の光強度変調素子の技術が記載されている。この光強度変調素子では、入力電気信号を10 Gbit/s NRZ (Non Return to Zero) の擬似ランダム信号で変調して、分散値 $D = 18\text{ psec/nm/Km}$ の光ファイバを用いて光伝送を行った結果、50 Km伝送を達成

している。これを前記文献2の第91頁に記載された図8に当てはめると、光強度変調素子の α パラメータは0

～1の範囲と考えられる。

【0003】 前記文献2においては、複数の外部変調方法を挙げ、かつそれらの α パラメータを比較している。 α パラメータは、光強度の変化と屈折率の変化の比を表すものである。この α パラメータは、光の強度変調と位相変調の結合の程度を表す一つの指標であり、光強度変調方式の光通信システム等において伝送容量限界を決める一つの重要なパラメータである。前記文献2の第91頁の図8に示されているように、伝送容量は

$-4 < \alpha < 0$... (1)

の時に大きく取れ、さらにその最大は $\alpha = -1$ 付近にあることが分かる。そのため、光強度変調素子の α パラメータを(1)式の範囲内にすること、あるいは α パラメータが(1)式になるような動作条件で光強度変調素子を駆動することが望ましい。

【0004】 ところで、電界吸収型光強度変調素子は、前記文献1にその基本原理が記載されているように、電界吸収効果を用い、電界を印加することによって光の吸収係数が変化する素子であり、構造が単純で、かつ動作電圧が小さく（例えば、3 V以下）、また半導体レーザ (LD) との集積化が可能であることから、ギガビット (Gbit) クラスの超高速変調で、長距離の光伝送を行う場合には有望である。前記文献2の第91頁の表1によれば、この電界吸収型光強度変調素子の α パラメータは、

... (2)

している。これを前記文献2の第91頁に記載された図8に当てはめると、光強度変調素子の α パラメータは0

～1の範囲と考えられる。

【0005】 【発明が解決しようとする課題】 しかしながら、従来の電界吸収型光強度変調素子では、次のような問題があり、それを解決することが困難であつた。従来の光強度変調素子においては、 α パラメータは正の値を持ってい

る。そのため、Gbitクラスの変調速度で、長距離の光伝送を考えた場合、例えば、変調速度10Gbit/s、光ファイバの分散値 $D=2\text{ psec/nm/Km}$ では、伝送距離が20~50Km程度に制限される。伝送距離が制限される理由は、光信号を光ファイバで伝送する場合、その光ファイバの波長分散によって光信号の波形劣化が生じるからである。本発明は、前記従来技術が持っていた課題として、伝送距離が制限される等といった点について解決し、優れた低波長チャージングの電界吸収型光強度変調素子と、該光強度変調素子と半導体レーザを組合せた光強度変調素子付き半導体レーザを提供することを目的とする。

【0006】

【課題を解決するための手段】第1の発明は、前記課題を解決するために、半導体基板上に形成され、i型光吸収層の両側にp型層とn型層が設けられたp-i-n構造に電圧を印加すると、該i型光吸収層に電界がかかり、その電界によって入射光の吸収係数が変化する光強度変調素子において、次のような手段を講じている。即ち、前記光吸収層を四元混晶であるInGaAsP等のバルク材料で形成し、かつ波長ディチューニング $\Delta\lambda$ を $20\text{ nm} \leq \Delta\lambda \leq 60\text{ nm}$ 、あるいはエネルギーディチューニング ΔE を $10.5\text{ meV} \leq \Delta E \leq 32.2\text{ meV}$ に設定している。第2の発明では、第1の発明の光強度変調素子において、光吸収層の厚さ d_a (μm) 及び素子長 L (μm) を次式から得られる値に設定している。

$$a_1 \exp\{0.045\Delta\lambda\} < L < a_2 \exp\{0.02\Delta\lambda\}$$

$$a_1 = -82.27d_a + 38.5$$

$$a_2 = -150.55d_a + 62$$

第3の発明では、光強度変調素子付き半導体レーザにおいて、第2の発明の光強度変調素子を、半導体レーザと組合せて、あるいは同一の半導体基板上に集積化して光出力を得る構成にしている。

【0007】

【作用】第1の発明によれば、以上のように光強度変調素子を構成したので、四元混晶であるInGaAsP等のバルク材料を用いて形成された光吸収層は、そのバンドギャップエネルギー E_g と、被変調光である入射光のフォトンエネルギー E_{in} の差（これをエネルギーディチューニング ΔE という）が、電圧印加によって生じる光吸収が増加し、かつ屈折率が減少するような働きをする。第2の発明によれば、光吸収層は、電圧無印加時での光の吸収をできるだけ抑え、かつ所望の消光効率が得られるような働きをする。第3の発明によれば、半導体レーザから出射されたレーザ光が光強度変調素子で変調されて出射される。

【0008】

【実施例】

第1の実施例

図1は、本発明の第1の実施例を示す電界吸収型光強度変調素子の構造図である。この光強度変調素子は、n型InPからなる半導体基板1を有している。半導体基板1上には、n型InPからなる下側クラッド層2と、厚さ約 $0.06\mu\text{m}$ 、PL (Photo Luminescence) ピーク波長 $1.30\mu\text{m}$ のn型InGaAsPからなるバッファ層3と、厚さ d_a が約 $0.30\mu\text{m}$ 、PLピーク波長 $1.50\mu\text{m}$ のundoped (不純物非添加) InGaAsPバルク材料からなる光吸収層4と、厚さ約 $0.06\mu\text{m}$ 、PLピーク波長 $1.30\mu\text{m}$ のundoped InGaAsPからなる拡散防止層5と、厚さ約 $2\mu\text{m}$ のp型InPからなるクラッド層6と、厚さ約 $0.2\mu\text{m}$ のp'型InGaAsからなるコンタクト層7とが、順次積層されている。この積層体は、上からp-i-n構造Aを成しており、このp-i-n構造Aに電圧 V_a を印加すると、光吸収層4からなるi層に電界がかかるようになっている。また、p-i-n構造Aは、幅 W が約 $3\mu\text{m}$ 、深さ D が約 $4\sim 5\mu\text{m}$ の垂直ストライプ構造（以下、ハイメサリッジ構造という）Bを形成している。

【0009】ハイメサリッジ構造Bの両脇は、電極容量を減らして変調帯域を広げるために、低誘電率のポリイミド8で埋め込まれている。ハイメサリッジ構造Bの上部のコンタクト層7上には、オーミックコンタクト電極9が形成され、さらにその上に上側ボンディング電極10が形成されている。この電極10に対応して、半導体基板1の下部には下側ボンディング電極11が形成され、それらの電極10と11間に電圧 V_a が印加されるようになっている。ハイメサリッジ構造Bの一方の端面から入射した入射光Pinは、そのハイメサリッジ構造B中を長さ L にわたり伝送されていき、他方の端面から出射光Poutの形で出力される。この光強度変調素子の両端面（即ち、入射光面及び出射光面）には、光ファイバ等の光学系との結合損失を小さくするために、図示しない反射防止膜（例えば、単層のSiO₂、膜等）が蒸着等で形成されている。このような構造の光強度変調素子は、例えば次のようにして製造される。

【0010】n型InP半導体基板1上に、MOVPE法等を用いてn型InP下側クラッド層2、n型InGaAsPバッファ層3、undoped-InGaAsPバルク光吸収層4、undoped-InGaAsP拡散防止層4、p型InP上側クラッド層6、及びp'型InGaAsコンタクト層7を順に成長していく。オーミックコンタクト電極形成予定領域に、SiO₂等のマスク材を選択的に形成する。このマスク材をマスクにして反応性イオンエッチング法（RIE法）等を用い、コンタクト層7、上側クラッド層6、拡散防止層5、光吸収層4、バッファ層3、及び下側クラッド層2をエッチングし、島状のハイメサリッジ構造Bを形成す

5

る。ハイメサリッジ構造Bの両側をポリイミド8で埋め込んだ後、素子の両端面に反射防止膜を被着する。そして、コンタクト層7上にオーミックコンタクト電極9を選択的に形成し、さらにその上に、上側ボンディング電極10を選択的に形成する。下側ボンディング電極11は、予め半導体基板1の裏面に形成しておけばよい。以上のような製造工程を経て、図1の光強度変調素子が製造される。

【0011】次に、このようにして製造された図1の光強度変調素子の動作特性等を説明する。上側ボンディング電極10と下側ボンディング電極11との間に電圧Vaを印加しない場合、光強度変調素子の一方の端面から入射された入射光Pinは、p-i-n構造Aからなる導波路中を素子長L方向へ伝搬され、該光強度変調素子の

$$\begin{aligned} & P_{out} / P_{in} \\ & = \eta^2 \exp \{ -\Gamma(d_i) (\alpha_0(\lambda_{i0}) + \Delta\alpha(\lambda_{i0}, F)) L \} \\ & \dots (3) \end{aligned}$$

但し、 η ；端面での光の結合効率

$\Gamma(d_i)$ ；導波路(p-i-n構造A)の光閉じ込め係数

$\alpha_0(\lambda_{i0})$ ；電圧無印加時の光吸収係数

$\Delta\alpha(\lambda_{i0}, F)$ ；電圧印加時の光吸収係数の変化

L；素子長(p-i-n構造Aのi層の長さ)

d_i ；光吸収層4の厚さ

λ_{i0} ；入射光(被変調光)Pinの波長

$$\begin{aligned} & 10 \log (P_{out} / P_{in}) \\ & = 20 \log \eta - 4.343 \Gamma(d_i) (\alpha_0(\lambda_{i0}) \\ & \quad + \Delta\alpha(\lambda_{i0}, F)) L \\ & = 20 \log \eta \\ & \quad - 4.343 \Gamma(d_i) \alpha_0(\lambda_{i0}) L \\ & \quad - 4.343 \Gamma(d_i) \Delta\alpha(\lambda_{i0}, F) L \quad [\text{dB}] \\ & \dots (4) \end{aligned}$$

(4)式の第2項より、電界無印加時の入射光Pinの伝搬損失Loss(F₀)は、

$$\begin{aligned} & \text{Loss}(F_0) = 4.343 \Gamma(d_i) \alpha_0(\lambda_{i0}) L \quad [\text{dB}] \\ & \dots (5) \end{aligned}$$

(4)式の第3項より、消光比ERは、

$$\begin{aligned} & ER = 4.343 \Gamma(d_i) \Delta\alpha(\lambda_{i0}, F) L \quad [\text{dB}] \\ & \dots (6) \end{aligned}$$

と表示される。また、消光比ERを印加電圧Vaで割った値、即ち消光効率ER-effは、次式(7)となる。なお、(4)式の第1項は、両端面での結合効率を

$$\begin{aligned} & ER\text{-eff} = 4.343 \Gamma(d_i) \Delta\alpha(\lambda_{i0}, F) L / V_a \\ & \quad [\text{dB}/V] \\ & \dots (7) \end{aligned}$$

光強度変調では、電界無印加時の伝搬損失Loss(F₀)は小さいほど良く、消光効率ER-effは大きいほど良い。光閉じ込め係数 $\Gamma(d_i)$ は光吸収層4の厚さ d_i が増すにつれて大きくなる。そのため、光吸収層4の厚さ d_i を大きくすると、消光効率ER-eff及び挿入損失が大きくなるので、伝搬損失Loss

6

他方の端面からそのまま出射光Poutの形で出力される。上側ボンディング電極10と下側ボンディング電極11との間に電圧Vaを印加すると、p-i-n構造A中のi層である光吸収層4に電界がかかり、その電界によって入射光Pinの吸収係数が変化し、該入射光Pinが遮断される。このようなオン、オフのスイッチ作用を利用し、被変調光である入射光Pinの変調が行われ、出射光Poutとして出力される。このような動作特性を解析するため、まず、光強度変調素子の端面での光の結合効率、伝搬損失、及び消光比を定式化する。入射光Pinに対する光強度変調素子からの出射光Poutは、次式

(3)で表される。

【0012】

F；印加する電界強度($F = V_a / d_i$ 、 V_a ；印加電圧、 d_i ；p-i-n構造Aのi層の厚さ)

この(3)式では、光吸収係数 α_0 及び光吸収係数の変化 $\Delta\alpha$ を正の値として扱うため、マイナスの符号を導入している。(3)式をデシベル(dB)表示すると、次式(4)となる。

【0013】

F；印加する電界強度($F = V_a / d_i$ 、 V_a ；印加電圧、 d_i ；p-i-n構造Aのi層の厚さ)

この(3)式では、光吸収係数 α_0 及び光吸収係数の変化 $\Delta\alpha$ を正の値として扱うため、マイナスの符号を導入している。(3)式をデシベル(dB)表示すると、次式(4)となる。

【0014】

(F₀)と消光効率ER-effは、厚さ d_i と素子長Lについて一方を大きくすると他方が小さくなり、一方を小さくすると他方が大きくなるというトレードオフの関係がある。また、電圧無印加時の光吸収係数 $\alpha_0(\lambda_{i0})$ は小さく、かつ電圧印加時の光吸収係数の変化を電圧Vaで割った値 $\Delta\alpha(\lambda_{i0}, F) / V_a$ は大きい方が

7

望ましい。 $\alpha_0(\lambda_{i0})$ と $\Delta\alpha(\lambda_{i0}, F)/V_a$ は、光吸収層4がバルク構造か量子井戸構造か、あるいは材料に何を用いているかによって異なるが、バルク構造を考えた場合、電界吸収効果を用いた光強度変調を行う時には、 $\alpha_0(\lambda_{i0})$ と $\Delta\alpha(\lambda_{i0}, F)/V_a$ は入射光波長(被変調光波長) λ_{i0} についてトレードオフの関係である。つまり、光吸収層4のバンドギャップ波長 λ_{g0} と被変調光波長 λ_{i0} の差(これを波長ディチューニング $\Delta\lambda$ という)について、トレードオフの関係にある。

【0015】次に、光強度変調素子の α パラメータについて検討する。 α パラメータは、前述したように光強度の変化と屈折率の変化の比を表すが、それらの計算例は、例えば前記文献4に記載されているので、それを図2(a), (b)に示す。図2(a), (b)は、材料としてInPと同じZinc-Blend型の半導体結晶であるGaAsを用いた、吸収係数の変化 $\Delta\alpha$ と屈折

$$\Delta E [\text{eV}] = E_g - E_{in} = 1.24 / \lambda_{g0} - 1.24 / \lambda_{in} \quad \dots (8-1)$$

あるいは、

$$\Delta \lambda [\mu\text{m}] = \lambda_{in} - \lambda_{g0} = 1.24 / E_{in} - 1.24 / E_g \quad \dots (8-2)$$

の関係がある。

【0016】以上の検討をもとに、実際に光吸収層4に2種類の組成のInGaAsPバルク材料(光吸収層組成1.47 μm 、1.50 μm)を用い、またそれぞれに対して2種類の厚さを設定して、電界吸収型光強度変調素子を作製し、挿入損失特性及び消光特性(挿入損失の電圧印加による変化量)の波長依存性を測定した。その測定結果の一例を図3(a), (b)に示す。図3

(a), (b)は、光吸収層組成1.47 μm 、光吸収層厚0.26 μm 、及び素子長200 μm の光強度変調素子における挿入損失特性及び消光特性の測定結果を示す図であり、同図(a)は挿入損失の入射光波長依存性を示す図、及び同図(b)は印加電圧による挿入損失の変化量の入射光波長依存性を示す図である。これらの図3(a), (b)より、電圧無印加時の伝搬損失 $L_{oss}(F_0)$ 及び消光効率 $ER - eff$ の入射光波長依存性が求められる。

【0017】図4は、図1の光強度変調素子を用いた光変調装置の構成例を示す図である。図4に示すように、光変調装置を半導体レーザ21、光強度変調素子22、及び光増幅素子(光増幅器)23の順で構成することを考える。このような光変調装置では、半導体レーザ21から出力されたレーザ光が、光強度変調素子22で変調され、光増幅素子23で増幅された後、光ファイバ等へ送出される。このような光変調装置において、光強度変

$$L_{(1111)} = a_1 \exp \{ 0.45 \Delta \lambda \} \quad \dots (9)$$

$$a_1 = -82.27 \text{ da} + 38.5 \quad \dots (10)$$

また、消光効率が4dB/Vとなる素子長 $L_{(1111)}$ は、

$$L_{(1111)} = a_2 \exp \{ 0.2 \Delta \lambda \} \quad \dots (11)$$

8

率の変化 Δn を示す図である。図2(a), (b)の横軸には、光のエネルギー $h\omega$ から電界 E_g を引いた値がとられている。この図2(a), (b)から明らかなように、バンドギャップエネルギー E_{g0} よりも約数十meV小さいフォトンエネルギー E_{in} を持つ光に対する吸収係数と屈折率共に、電界印加によって増加する(α パラメータは正の値となる)。これに対し、

$$\Delta E = E_{g0} - E_{in} < \text{約 } 30 \text{ meV}$$

の範囲では、吸収係数は増加するが屈折率は減少し(α パラメータは負の値となる)、(1)式を満たす α パラメータを得ることが可能である。GaAsと同様に、InPにおいても、光吸収層4のエネルギーディチューニング ΔE を適当に選ぶことにより、(1)式を満たす α パラメータを得ることができる。但し、エネルギーディチューニング ΔE と波長ディチューニング $\Delta \lambda$ には、

調素子22に要求される挿入損失 $L_{(1111)}$ は、半導体レーザ21から光強度変調素子22に入るパワー $P_{(1111)}$ と、光増幅素子23を通過した後の信号光の信号/雑音(SN)が極端に悪くならない程度の該光増幅素子23への平均入力パワー $P_{(1111)}$ を考慮しなければならない。ここで、一般的な値として、パワー $P_{(1111)} = +10 \text{ dBm}$ 、平均入力パワー $P_{(1111)} = -15 \text{ dBm}$ を用い、またNRZ変調信号のマーク率(1010…の繰り返しの場合のデューティ比に相当する)が1/2(=50%=3dB)であるとする、

$$L_{(1111)} = 10 - (-15) - 3 = 22 \text{ dB}$$

となる。さらに、光強度変調素子22の両端面での結合効率を7dBとすると、該光強度変調素子22内での伝搬損失 $L_{oss}(F_0)$ は、

$$22 - 7 = 15 \text{ dB以下}$$

にする必要がある。また、消光比12dBを印加電圧3V以下で得ることを考えると、消光効率 $ER - eff$ は4dB/V以上でなければならない。

【0018】そこで、伝搬損失 $L_{oss}(F_0)$ が15dB以下、消光効率 $ER - eff$ が4dB/V以上を得ることができる波形ディチューニング $\Delta \lambda$ の量、光吸収層厚 d_a 、及び素子長 L の範囲を求める経験式を、前述の測定結果から導いた。それによると、伝搬損失 $L_{oss}(F_0)$ が15dBとなる素子長 $L_{(1111)}$ は、

9

$$a_2 = -150.55da + 62$$

となる。但し、単位は素子長 L が μm 、波長ディチューニング $\Delta\lambda$ が nm 、及び光吸収層厚 da が μm である。従って、任意のディチューニングと光吸収層厚を(9)式及び(11)式に代入し、そして、(9)式から得られる値よりも短く、かつ(11)式から得られる値よりも長く素子長 L を設定すれば良い。

【0019】図5は、光吸収層厚 dj をパラメータとして、消光効率 4dB/V 、及び挿入損失 15dB を満たす素子長 L の波長ディチューニング依存性を示す図である。この図5では、(9)式と(11)式を用いて、光吸収層厚 dj を $0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40\mu\text{m}$ とした時の計算値を示している。図6は、作製した光強度変調素子における入射光

$$20 \leq \Delta\lambda \leq 60\text{nm}, \text{あるいは}, 10.5 \leq \Delta E \leq 32.2\text{meV}$$

図7は、図1及び図4の光強度変調素子22の変調帯域を説明する図である。Gbit/sクラスの変調速度で光強度変調素子22に変調信号を印加する場合、変調帯域を考慮する必要がある。変調帯域を制限するものは、電界がかかるp-i-n構造Aのi層(光吸収層4)の接合容量や電極間容量、上側ボンディング電極10及び下側ボンディング電極11に接続されるワイヤ等のインダクタンス、コンタクト層7及びオーミックコンタクト電極

$$\begin{aligned} f_{3dB} &= 1 / (\pi \cdot R \cdot C_j) \\ &= 1 / (\pi \cdot R) \cdot dj / (\epsilon \cdot W \cdot L) \\ &= 1 / (\pi \cdot \epsilon \cdot R) \cdot dj / (W \cdot L) \end{aligned} \quad \dots (14)$$

$$L = dj / (\pi \cdot \epsilon \cdot R \cdot W \cdot f_{3dB}) \quad \dots (15)$$

但し、 W : p-i-n構造Aのi層の幅

ϵ : p-i-n構造Aのi層の誘電率

(14)式より、i層の厚さ dj が厚いほど、幅 W と長さ L が小さいほど、光強度変調素子22の変調帯域 f_{3dB} が大きくなることが分かる。i層の厚さ dj と幅 W が分かっており、また光強度変調素子22に要求される変調帯域 f_{3dB} が決まれば、(15)式に示すように、素子長 L の上限が決定されることになる。以上の光吸収層4の組成波長、光吸収層4の厚さ dj 、及び素子長 L に関する検討に、前述した本実施例の光吸収層組成 $1.50\mu\text{m}$ 、厚さ $0.3\mu\text{m}$ 、素子長 $10\mu\text{m}$ 及び $150\mu\text{m}$ を当てはめると、図8のようになる。

【0022】図8は、図1の光強度変調素子の設計例を示す図である。図8中の斜線部分は、(9)式で表される素子長 $L_{(100,100)}$ と、(11)式で表される素子長 $L_{(100,100)}$ と、(13)式より得られる波長ディチューニング $\Delta\lambda$ の上限 60nm に囲まれている領域を表している。その斜線部分内に本実施例が黒丸でプロット(光吸収層組成 $1.50\mu\text{m}$ 、光吸収層厚 $0.3\mu\text{m}$ 、素子長 $100, 150\mu\text{m}$)されている。この図8から明らかのように、要求される全ての特性を満たすことが理解される。なお、図8の変調帯域 $f_{3dB} = 10\text{GHz}$ 及び f

10

$$\dots (12)$$

波長を $1.55\mu\text{m}$ とした時の α パラメータの波長ディチューニング依存性を示す図である。この図6より、

(1)式を満たすには、次式(13)のように、波長ディチューニング $\Delta\lambda$ は 60nm 以下、あるいはエネルギーディチューニング ΔE は 32.2meV 以下とする必要がある。なお、波長ディチューニング $\Delta\lambda$ は 20nm よりも小さい、あるいはエネルギーディチューニング ΔE は 10.5meV よりも小さいと、伝搬損失 L_{oss} (F₀)が大きくて実用性が無いため、波長ディチューニング $\Delta\lambda$ は 20nm 以上、あるいはエネルギーディチューニング ΔE は 10.5meV 以上にすることが望ましい。

【0020】

$$20 \leq \Delta\lambda \leq 60\text{nm}, \text{あるいは}, 10.5 \leq \Delta E \leq 32.2\text{meV}$$

$$\dots (13)$$

9におけるオーミックコンタクト層での直列抵抗や終端抵抗 R を考慮しなければならないが、その中でも最終的に残るのは、i層の接合容量 C_j と終端抵抗 R である。図7に示すように、接合容量 C_j と終端抵抗 R の2つのみが並列に接続されている場合には、光強度変調素子22の変調帯域 f_{3dB} は次式(14)、(15)で表される。

【0021】

$$\begin{aligned} f_{3dB} &= 1 / (\pi \cdot R \cdot C_j) \\ &= 1 / (\pi \cdot R) \cdot dj / (\epsilon \cdot W \cdot L) \\ &= 1 / (\pi \cdot \epsilon \cdot R) \cdot dj / (W \cdot L) \end{aligned} \quad \dots (14)$$

$$L = dj / (\pi \cdot \epsilon \cdot R \cdot W \cdot f_{3dB}) \quad \dots (15)$$

$f_{3dB} = 20\text{GHz}$ を表す破線は、i層の比誘電率を12とし、幅 W を $3\mu\text{m}$ 、終端抵抗 R を 50Ω とした時の(15)式より計算される素子長 L を示している。但し、光吸収層4の厚さ da とp-i-n構造Aのi層の厚さ dj を区別しているが、これはp型不純物であるZnの結晶成長中の拡散を考慮したものであり、ここでは $da = dj$ として計算している。

【0023】以上のように、本実施例の光強度変調素子では、次のような利点(a)、(b)がある。

(a) 本実施例の光強度変調素子では、 α パラメータを(1)式で設定した値になるように、波長ディチューニング $\Delta\lambda$ あるいはエネルギーディチューニング ΔE を設定しつつ、光吸収層4の厚さ da 及び素子長 L を適当に選ぶことにより、要求される挿入損失 $L_{(100,100)}$ 及び消光効率 $ER - eff$ を満たすようにしている。そのため、図4に示すように、本実施例の光強度変調素子22を用いて、光通信システムにおける信号光を形成するための光変調装置を構成した場合、文献2の図8に示されているような大きな伝送容量を得ることが可能となる。

(b) 前記(a)の効果の確認実験として、ビットレートが 10Gbit/s 、光ファイバの分散値が約 18psec/nm/Km 、光強度変調素子のバイアス電圧

が -1V bias 、光強度変調素子の振幅電圧（ピークツーピーク）が 1V_m の条件で、光伝送実験を行い、その結果を図9に示す。

【0024】図9は、図1の光強度変調素子（光吸収層組成 $1.50\mu\text{m}$ 、光吸収層厚 $0.3\mu\text{m}$ 、素子長 $150\mu\text{m}$ ）を用いて行った光伝送実験より得られたパワーペナルティの総分散量依存性を示す図である。パワーペナルティ 2dB を与える総分散量が、伝送できる上限を示すものとする、分散値 18psec/nm/Km 及び分散値 2psec/nm/Km の光ファイバを用いた場合には、それぞれ約 80Km 、及び 750Km 伝送できることが分かる。この結果は、従来の分散量限界の約2倍近い値であり、本実施例の光強度変調素子が光通信の長距離化、及び大容量化に大きく寄与することを実証するものである。

【0025】第2の実施例

図10は、本発明の第2の実施例を示すもので、第1の実施例（図1及び図4）の電界吸収型光強度変調素子22と半導体レーザ21とを同一の半導体基板上に集積化して構成した光強度変調素子付き半導体レーザの構造図であり、図1及び図4中の要素と共通の要素には共通の符号が付されている。この光強度変調素子付き半導体レーザでは、同一の n 型 InP 半導体基板1上に、図1と同一の構造の光強度変調素子22と図4の半導体レーザ21とが集積化して形成されている。半導体レーザ21は、例えばDFBレーザ（Distributed Feed Back laser）で構成され、butt-joint法を用いて光強度変調素子22と光結合されている。半導体レーザ21は、通常の $p-n$ ブロック層を有する埋め込み構造であり、 n 型 InP からなる下側クラッド層2、 InGaAsP からなる活性層31、 p 型 InGaAsP からなるガイド層32、 p 型 InP からなるブロック層33、 n 型 InP からなるブロック層34、 p 型 InP からなる上側クラッド層6、 p 型 InGaAs からなるキャップ層35、オーミックコンタクト電極36、及び上側ボンディング電極37から構成されている。

【0026】このような構造の光強度変調素子付き半導体レーザは、例えば次のようにして製造される。まず、半導体基板1上に、MOVPE法等で下側クラッド層2を成長し、さらに光強度変調素子領域にバッファ層3を選択成長する。半導体レーザ領域に、多重量子井戸型の活性層31、及びガイド層32を順に成長する。ガイド層32にグレーティングを形成し、この後形成された層を島状に残してエッチングし、さらに、光強度変調素子領域に光吸収層4及び拡散防止層5を選択成長する。活性層31の領域と光吸収層4の領域とをそれぞれ所定の幅でウェットエッチングした後、ブロック層33、34からなる $p-n$ 構造の電流ブロック層を形成し、ウエハ全体を p 型 InP で埋め込む。光吸収層4の領域は、単体の光強度変調素子と同様に、RIE法等によって所定

の幅のハイメサリッジ構造Bを形成した後、ポリイミド8で埋め込む。その後、素子の前端面（出射光 P_{out} 側端面）に反射防止膜を施し、さらに電極9、10、36、37等を形成すれば、光強度変調素子付き半導体レーザの製造が終了する。

【0027】このようにして製造された光強度変調素子付き半導体レーザでは、上側ボンディング電極37と下側ボンディング電極11との間、さらに上側ボンディング電極10と下側ボンディング電極11との間に、それぞれ所定の電圧を印加すると、半導体レーザ21内の活性層31からレーザ光が射出される。このレーザ光は、光強度変調素子22内の光吸収層4等で変調された後、素子の前端面から出射光 P_{out} が出力される。このような光強度変調素子付き半導体レーザでは、同一の半導体基板1上に半導体レーザ21と光強度変調素子22とが集積化して形成されているので、素子の小型化が図れると共に、半導体レーザ21の出射光側と光強度変調素子22の入射光側とが直接に光結合されているので、両者の結合損失が小さくなり、大きな伝送容量が得られる。

【0028】なお、本発明は上記実施例に限定されず、種々の変形が可能である。その変形例としては、例えば次のようなものがある。

(1) 図1及び図10の光強度変調素子22の埋め込み構造として、ポリイミド8を用いているが、変調帯域に依じてこれ以外の埋め込み構造（例えば、 Fe-doped InP 層等を含む埋め込み層）を用いてもよい。

(2) 図1及び図10において、半導体基板1の極性、その半導体基板1の結晶の面方位、光強度変調素子22のストライプの形成方向、光導波路を構成する $p-i-n$ 構造Aの形成方法、半導体レーザ21の形成方法、あるいは結晶の成長方法等について、上記実施例に限定されず、種々の変形が可能である。また、上記実施例では、 InP 系の材料を用いた場合について説明したが、 GaAs 等の他の材料を用いる場合についても本発明を適用できる。

(3) 図1の光吸収層4を形成するためのバルク材料とは、量子井戸構造の中でも量子効果がでない程度に井戸層厚が厚い場合（通常、 $10\sim 20\text{nm}$ 以上）についても本発明を適用できる。

【0029】(4) 第1の実施例では、NRZ変調方式のIM/DD（Intensity Modulation / Direct Detection、強度変調／直接検波）の光伝送に用いられる光強度変調素子22について説明したが、これを他の用途に用いてもよい。例えば、上記実施例の光強度変調素子22を、光ソリトン通信における変調信号パルス列を形成するための変調器として用いてもよい。

(5) 図10では、半導体レーザ21としてDFBレーザについて説明したが、他のレーザについても光強度変調素子22との集積化が行える。また、図10では、

13

光強度変調素子22と半導体レーザ21とを同一の半導体基板1上に集積化して形成したが、これらを異なる半導体基板上に形成して両者を光結合させる構造等にしても、上記実施例とほぼ同様の効果が得られる。さらに、半導体レーザ21以外の光源を用い、その光源と光強度変調素子22とを組合せて、あるいはそれらを同一の半導体基板上に集積化して光強度変調素子付き光源装置を構成することも可能である。

【0030】

【発明の効果】以上詳細に説明したように、第1及び第2の発明によれば、光強度変調素子の α パラメータを所定の値になるように、ディチューニングを設定し、さらに光吸収層の厚さ及び素子長を適宜選定することにより、要求される挿入損失及び消光効率を満たすようにしたので、本発明の光強度変調素子を光通信システム等に用いた場合、大きな伝送容量を得ることが可能となる。従って、光通信等の長距離化、及び大容量化等が期待できる。第3の発明によれば、第2の発明の光強度変調素子と半導体レーザとを組合せて、あるいは同一の半導体基板上に集積化して光出力を得る構成にしたので、素子の小型化が可能になる。しかも、光強度変調素子と半導体レーザとの結合損失が小さくなるので、出射効率が良く、高い信頼性の光強度変調素子付き半導体レーザを提供できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施例を示す光強度変調素子の構造図である。

【図2】GaAsの吸収係数の変化及び屈折率の変化を示す図である。

【図3】図1の挿入損失特性及び消光特性の測定結果を示す図である。

【図4】図1の光強度変調素子を用いた光変調装置の構成例を示す図である。

【図5】図1の光吸収層厚 d_j をパラメータとして消光

14

効率4dB/V、及び挿入損失15dBを満たす素子長Lの波長ディチューニング依存性を示す図である。

【図6】図1の α パラメータにおける入射光波長依存性を示す図である。

【図7】図1の光強度変調素子における変調帯域の説明図である。

【図8】図1の光強度変調素子における設計例を示す図である。

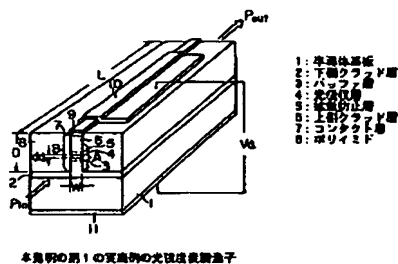
【図9】図1の光強度変調素子を用いて光伝送実験を行い、その光伝送実験より得られたパワーペナルティの総分散量依存性を示す図である。

【図10】本発明の第2の実施例を示す光強度変調素子付き半導体レーザの構造図である。

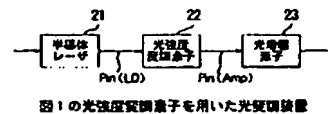
【符号の説明】

1	半導体基板
2	下側クラッド層
3	バッファ層
4	光吸収層
5	拡散防止層
6	上側クラッド層
7	コンタクト層
8	ポリイミド
9, 36	オーミックコンタクト電極
10, 37	上側ボンディング電極
11	下側ボンディング電極
21	半導体レーザ
22	光強度変調素子
31	活性層
32	ガイド層
33, 34	ブロック層
35	キャップ層
A	p-i-n構造
B	ハイメサリッジ構造

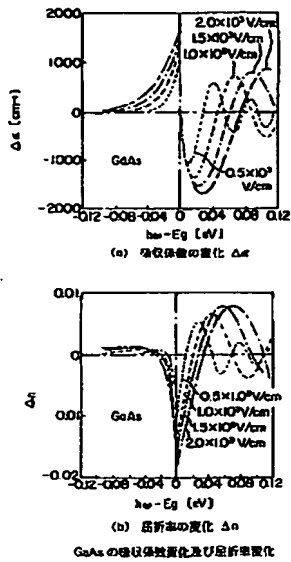
【図1】



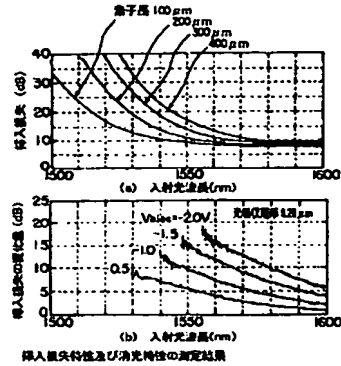
【図4】



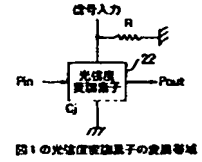
【図2】



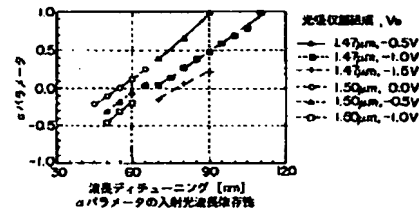
【図3】



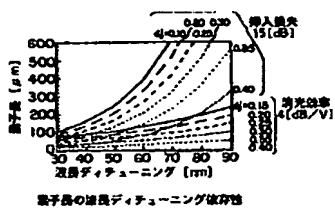
【図7】



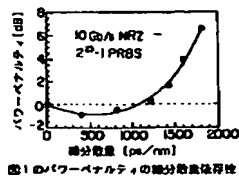
【図6】



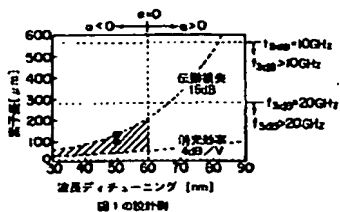
【図5】



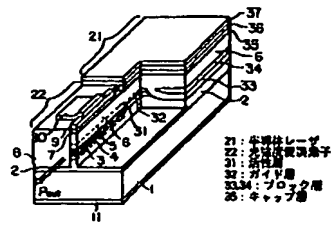
【図9】



【図8】



【図10】



本発明の第2の実施例の光導性有機分子付き半導体レーザ